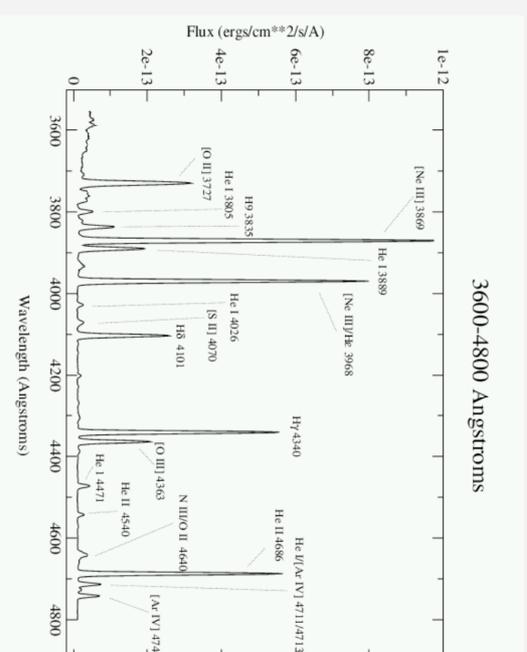


## Espectro de nebulosa planetária



## História

- Fraunhofer (1814)
  - ◊ identificou > 500 bandas escuras – linhas de Fraunhofer - no espectro solar usando um espectrógrafo (sua invenção)
    - em 1802, Wollaston já as tinha notado...
- Kirchhoff & Bunsen (1859)
  - ◊ origem das linhas de absorção do espectro solar: transições eletrônicas
- Novo elemento identificado no espectro solar, Hélio
  - ◊ 1868 – Janssen & Lockyer
- Catálogo Henry Draper (HD) – 1918 e 1924
  - ◊ catálogo espectroscópico de 225.000 objetos
    - Harvard College Observatory: supervisão de Pickering, compilação de Cannon

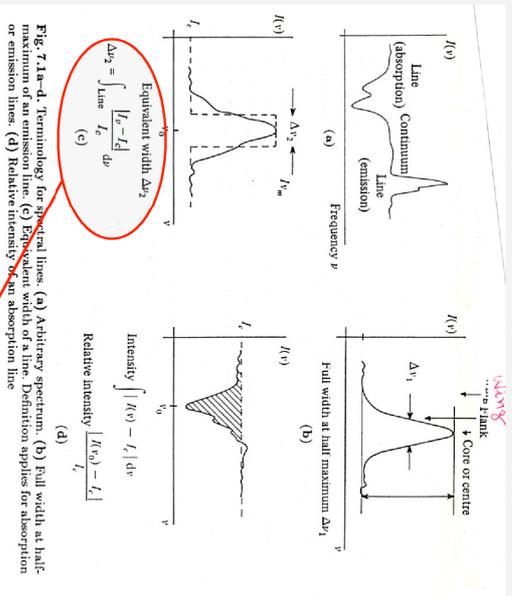
## Linha espectral

- Uma linha ou banda em um espectro astrofísico pode ser descrita por:
  - ◊ sua posição;
  - ◊ sua intensidade;
  - ◊ forma;
  - ◊ polarização.

## Parametrização das linhas espectrais

- O perfil da linha é comumente parametrizado de maneira simplificada pelos seguintes parâmetros:

- ↪ largura total a meia-altura
- ↪ largura equivalente
- ↪ intensidade



Léna

Medida de intensidade!

- As **linhas espectrais** carregam muitas informações dos processos e das condições físicas existentes na fonte (Processos Radiativos II). Alguns exemplos:

Característica da linha	Informação
Posição	Elemento, transição Abundância
Intensidade ou largura equivalente	Temperatura, pressão, gravidade
Posição e perfil	Campo de velocidade macroscópico
Perfil	Campo de velocidade microscópico
Polarização	Campo magnético

Table 7.1. Bound-bound transitions

Transitions	Energy [eV]	Spectral region	Example
Hyperfine structure	$10^{-5}$	Radiofrequencies	21 cm hydrogen line
Spin-orbit coupling	"	"	1666 MHz transitions of OH molecule
Molecular rotation	$10^{-2}-10^{-4}$	Millimetric, infrared	1-0 transition of CO molecule at 2.6 mm
Molecular rotation-vibration	$1-10^{-1}$	Infrared	H <sub>2</sub> lines near 2 μm
Atomic fine structure	$1-10^{-3}$	Infrared	Ne II line at 12.8 μm
Electronic transitions of atoms, molecules and ions	$10^{-2}-10$	Ultraviolet, visible, infrared	Lyman, Balmer, etc. series of H, resonance lines of C I, He I
Nuclear transitions	$10-10^4$	Ultraviolet, X-ray	K, L shell electron lines
Annihilations	$> 10^4$	Gamma rays	<sup>12</sup> C line at 15.11 MeV
	$\gtrsim 10^4$		positronium line at 511 keV

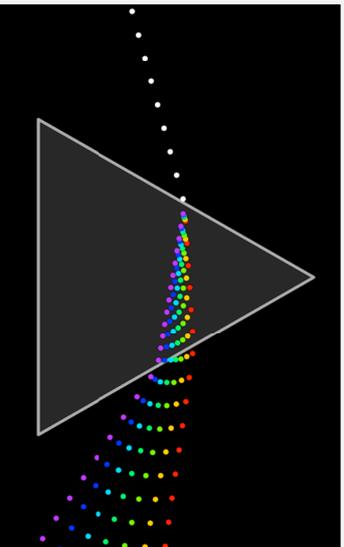
Léna

## Espectroscopia

- No intervalo óptico, o método mais comum para a obtenção de um espectro baseia-se na utilização de um elemento dispersor, isto é, um elemento que separa um feixe policromático em suas diferentes componentes de frequência
- Vamos a seguir discutir dois elementos dispersores:
  - ↪ prismas
  - ↪ redes de difração ou reflexão
 → são os elementos dispersores mais comuns nas implementações atuais de espectrógrafos

## Elementos dispersores - Prisma

- Princípio físico:
  - ↳ refração da luz ao atravessar a interface entre dois meios opticamente distintos, i.e., com diferentes índices de refração



Wikipedia - Spectroscopy

AST203 – CVR

9-13

## Prisma

- Se os dois meios forem transparentes (sem absorção), isotrópicos e isotérmicos aplica-se a Lei de Snell
  - ↳ onde  $\mu_i$  é o índice de refração (real) do meio  $i$ ;
  - ↳  $i=1$  representa o meio onde se encontra o feixe incidente
  - ↳ Os gases em geral, e o ar em particular, possuem índice de refração unitário

- Assim, a propagação da luz por um prisma pode ser descrita como:

$$\mu_\lambda = \frac{\text{sen } i_1}{\text{sen } r_1} = \frac{\text{sen } r_2}{\text{sen } i_2}$$

AST203 – CVR

9-14

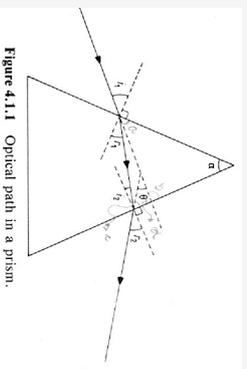


Figure 4.1.1 Optical path in a prism.

Kitchin

fórmula de dispersão de Hartmann

So that using equation (4.1.3) and using the relations

$$\mu_\lambda = \frac{\text{sen } i_1}{\text{sen } r_1} = \frac{\text{sen } r_2}{\text{sen } i_2} \quad (4.1.8)$$

we get

$$\alpha = r_1 + i_2 \quad (4.1.9)$$

$$\theta = i_1 - \alpha + \text{sen}^{-1} \left[ \left( A + \frac{B}{\lambda - C} \right) \text{sen} \left[ \alpha - \text{sen}^{-1} \left( \frac{\text{sen } i_1}{A + [B]/(\lambda - C)} \right) \right] \right] \quad (4.1.10)$$

Now we wish to maximise  $\partial\theta/\partial\lambda$ , which we could study by differentiating equation (4.1.10), but which is far easier to obtain from

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda} = \frac{\partial\lambda_1 - \partial\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} \quad (4.1.11)$$

so that

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda} = (\lambda_1 - \lambda_2)^{-1} \left[ \text{sen}^{-1} \left\{ \mu_{\lambda_1} \text{sen} \left[ \alpha - \text{sen}^{-1} \left( \frac{\text{sen } i_1}{\mu_{\lambda_1}} \right) \right] \right\} - \text{sen}^{-1} \left\{ \mu_{\lambda_2} \text{sen} \left[ \alpha - \text{sen}^{-1} \left( \frac{\text{sen } i_1}{\mu_{\lambda_2}} \right) \right] \right\} \right] \quad (4.1.12)$$

The effect of altering the angle of incidence or the prism angle is now most

AST203 – CVR

9-15

- $\alpha$  é o ângulo do prisma e pode ser escrito como:
 
$$\alpha = r_1 + i_2$$
- $\theta$  é o desvio total do raio e pode ser escrito como:
 
$$\theta = r_2 + i_1 - \alpha$$

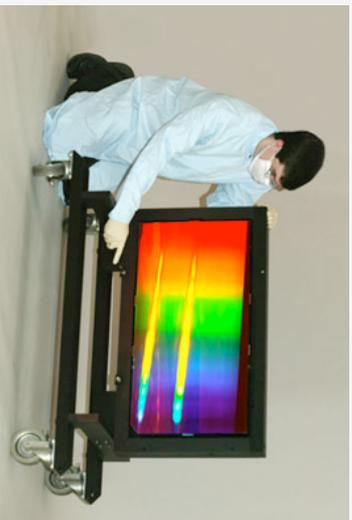
- ↳  $i_1$  e  $\alpha$  são constantes para um feixe de entrada, mas...
- ↳  $r_2$  depende do índice de refração do prisma que depende do comprimento de onda, portanto:
  - o desvio é diferente para cada comprimento de onda

AST203 – CVR

9-16

## Redes de difração

⇨ Uma rede de difração é um anteparo composto por  $N$  aberturas de mesma largura  $D$  separadas entre si pela distância  $d$



Wikipedia - Diffraction grating

AST203 – CVR

9-17

## Redes – como funcionam?

⇨ uma onda de luz plano-paralela de incidência normal ao atravessar uma rede de difração sofre interferência de modo que a distribuição angular é:

$$I(\theta) = I(0) \frac{\text{sen}^2\left(\frac{\pi D \text{sen} \theta}{\lambda}\right)}{\left(\frac{\pi D \text{sen} \theta}{\lambda}\right)^2} \text{sen}^2\left(\frac{N \pi d \text{sen} \theta}{\lambda}\right)$$

→  $D$ : largura de uma abertura

→  $N$ : número de aberturas

→  $d$ : separação das aberturas

Inventada  
por  
Fraunhofer

AST203 – CVR

9-18

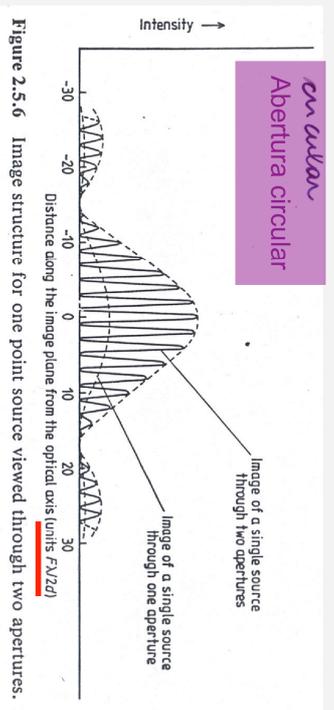


Figure 2.5.6 Image structure for one point source viewed through two apertures.

Abertura = fenda

Kitchin

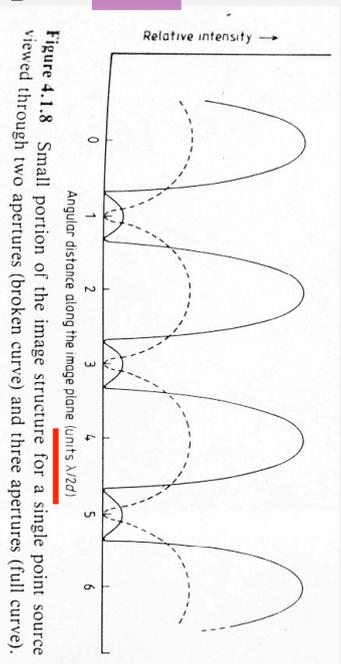


Figure 4.1.8 Small portion of the image structure for a single point source viewed through two apertures (broken curve) and three apertures (full curve).

AST203 – CVR

9-19

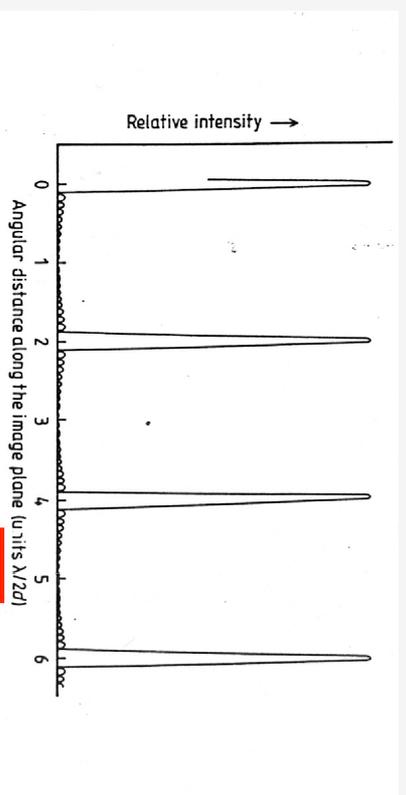


Figure 4.1.9 Small portion of the image structure for a single point source viewed through twenty apertures.

Kitchin

AST203 – CVR

9-20

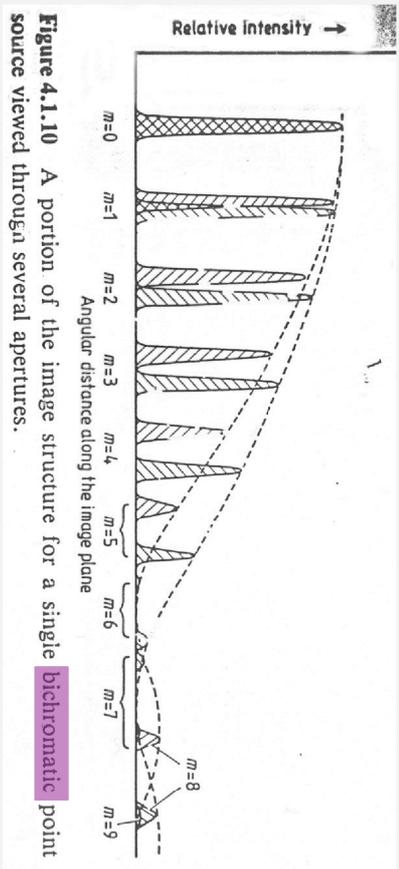


Figure 4.1.10 A portion of the image structure for a single bichromatic point source viewed through several apertures.

Kitchin

- Para um dado comprimento de onda, as posições dos máximos são:

$$\text{sen } \theta = \frac{m\lambda}{d} \Rightarrow \theta = \arcsen \left[ \frac{m\lambda}{d} \right]$$

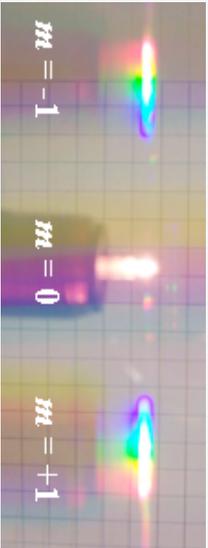
↪ onde  $m$  assume valores inteiros

$m$  é a ordem da franja

- Portanto cada ordem corresponde a um espectro do feixe incidente na rede

↪ não há dispersão para  $m = 0$

Luz de um bulbo observada através de uma rede de difração de transmissão



Wikipedia - diffraction grating

- Largura da franja

↪ distância angular entre mínimos adjacentes ao pico

$$W = \frac{2\lambda}{Nd \cos \theta}$$

independe de  $m$

- Resolução espacial (Rayleigh)

$$W_{\text{esp}} = \frac{\lambda}{Nd \cos \theta}$$

$\Delta\theta$  – largura da franja

- Resolução espectral

$$W_{\lambda} = W_{\text{esp}} \frac{d\lambda}{d\theta}$$

Separação das franjas de dois  $\lambda$  com critério de resolução de Rayleigh

$$W_{\lambda} = \frac{\lambda}{Nm}$$

$\Delta\lambda$

- Costuma-se usar a seguinte definição para a resolução espectral de um espectrógrafo

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{\lambda}{W_\lambda}$$

que para redes assume o valor

$$R = Nm$$

A resolução,  $R$ , de um espectrógrafo de rede depende apenas da ordem utilizada e do número de aberturas da rede

- Intervalo espectral livre,  $\Sigma$ 
  - ↳ diferença entre dois comprimentos de onda superpostos de ordens espectrais adjacentes

$$\Sigma = \lambda_1 - \lambda_2 = \frac{\lambda^2}{m}$$

- se  $m$  é pequeno,  $\Sigma$  é grande, e valores indesejados de  $\lambda$  podem ser retirados com um filtro
- se  $m$  é grande, é necessário usar um elemento dispersor cruzado

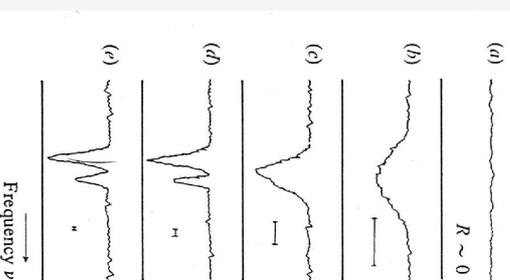


Fig. 7.2. Observation of a spectral line at increasing resolution. (a)  $R \sim 0$ ; (b) the line appears, (c) the line appears double, but not resolved (blend); (d) the two lines are resolved; (e) the true width of the lines is reached and increasing  $R$  will not improve the line purity. The horizontal line shows the instrumental spectral width  $\Delta\nu$  in each observation

- Se feixe não incide normalmente na rede, a imagem angular (= espectro) desloca-se de acordo com o ângulo  $i$  entre a incidência e a normal à rede
- Desse modo, os máximos do padrão de difração são dados pela **equação de rede**

$$\theta = \text{arcsec} \left[ \left( \frac{m\lambda}{d} \right) - \text{sen } i \right]$$

- No caso geral,

$$\text{sen } i \pm \text{sen } \theta = \frac{m\lambda}{d}$$

Comprimento de onda central muda com a rotação da rede em torno do eixo

## Equação de rede

## Características de rede

- As redes podem ser de:
  - ↳ transmissão (aberturas)
  - ↳ reflexão (aberturas substituídas por espelhos)
  - ↳ por índice de refração (*redes de fase*)
- Redes típicas
  - ↳ 100 – 1000 aberturas/mm
  - ↳ 1000 – 50.000 aberturas no total

- Problemas das redes

- ↳ superposição de ordens
  - correção com filtros
  - ↳ máximos secundários
- ↳ erros na construção da rede
  - erro mais comum: variação periódica no espaço das ranhuras
    - \* fantasmas de Rowland
    - variação com único período
    - linhas espúrias próximas a linhas fortes
    - \* fantasmas de Lyman
    - variação de períodos múltiplos
    - linhas espúrias associadas a linhas fortes, mas longe delas

## Blazing

- Desvantagem da rede de difração
  - ↳ luz da fonte é dividida nas várias ordens. Assim, perde-se luz
- Solução: Blazing
  - ↳ técnica que concentra maior parte da luz em uma dada ordem
  - ↳ técnica usada em redes de reflexão
  - ↳ cada espelho é inclinado com relação ao eixo da rede
  - ↳ ordens baixas: até 90% de eficiência
- Sombreamento
  - ↳ se a luz é refletida ou incide a grandes ângulos, a própria rede pode interceptar parte do feixe e causar perda de luz
  - ↳ não existe solução para esse problema
    - o que pode ser feito é evitar incidência a ângulos altos

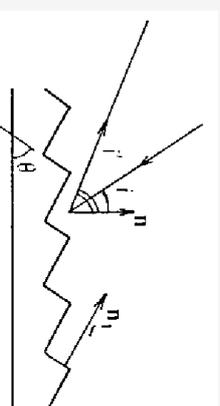


Fig. 5.7. Blazed grating.  $n$  is normal to the grating,  $n_1$  is normal to the blazed faces, and  $\theta$  is the blaze angle

Léna

- Rede echelle
  - ↳ blazing com ângulos altos
  - ↳ concentra a luz em altas ordens (10-100)
  - ↳ alta dispersão
  - ↳ dispersor cruzado
  - ↳ montagem compacta – em comparação com um espectrógrafo com câmara com distância focal longa que é outra opção para aumentar resolução

- Grismas
  - ↳ rede de transmissão na hipotenusa de um prisma
  - ↳ espectro de ordem 1 paralelo ao eixo do feixe incidente
  - ↳ pode ser montado como um filtro em uma câmara direta permitindo espectroscopia de baixa dispersão

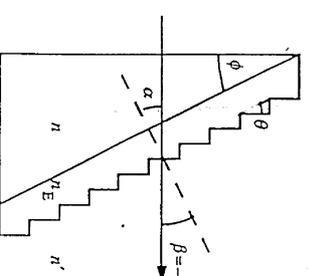


Fig. 4.4. A simplified schematic giving the basic geometry of a grism—a transmission diffraction grating deposited on the hypotenuse face of a right-angled prism.

Lêna

*Echelle Grating.* The principle here consists in using a very high order of interference  $m$ , with a large period  $a$  ( $\gg \lambda$ ), and a high angle of incidence, such that  $i = i' = \theta$  *Littrow condition*. At the blaze wavelength, the grating relation is (Fig. 5.8)

$$m\lambda_b = 2a \sin i = 2\lambda,$$

and the resolution  $R$  is, for a slit of width  $L$  and a collimator of focal length  $f_{\text{coll}}$ ,

$$R = 2 \tan \theta \frac{f_{\text{coll}}}{L}.$$

As  $a$  is relatively large, the periodicity can be accurately maintained over a large number of grooves, which leads to high resolution ( $R = m\lambda$ ) and high dispersion ( $\propto m/a$ ).

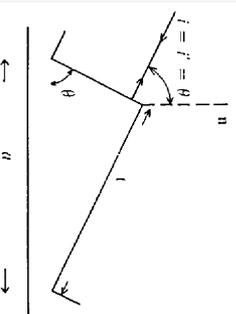


Fig. 5.8. Echelle Grating

5.3 Interferometric Spectrometers 221

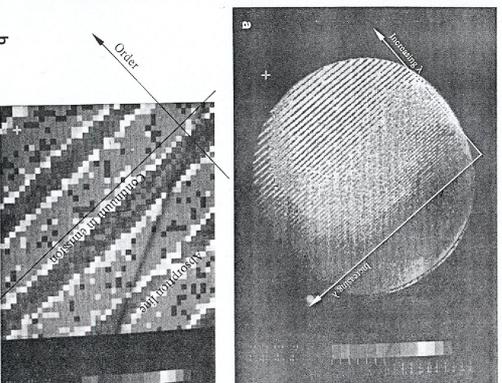


Fig. 5.9. Echelogram obtained by the International Ultraviolet Explorer (IUE) satellite mission. Spectrum of the A-type supergiant  $\alpha$  Cyg in the range 200–330 nm. Spectral resolution is 0.25 Å/cm, with 0.25 Å/cm in each pixel corresponding to an increment of 16 counts. (a) Photo of the whole field. (b) Enlargement showing an emission continuum and an absorption line. (European Space Agency and Praderie F., 1984, private communication)

# Espectrógrafos

- Configuração básica de um espectrógrafo sem fenda
  - ↪ esta configuração é normalmente utilizada para levantamentos e objetos extensos
  - ↪ elemento dispersor
  - ↪ câmera
  - ↪ detector

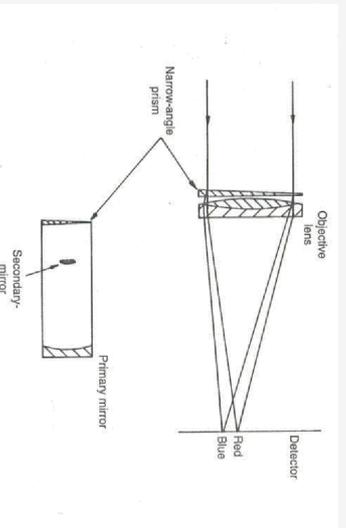


Fig. 3.14. An objective prism spectrometer: a narrow-angle prism is placed in the parallel beam in front of the objective and produces a spectrum directly in the focal plane of the telescope. Because there is no slit, a spectrum is formed of every object in the field of view of the telescope. A low-dispersion transmission grating can also be used. In a reflecting telescope, the dispersing element is placed outside the secondary mirror, as in the lower diagram. The angle of the prism is exaggerated in the drawing; an actual objective prism cannot easily be distinguished by the eye from a circular sheet of plane glass.

Smith

- Configuração básica de um espectrógrafo de fenda
  - ↪ fenda
  - ↪ colimador
  - ↪ elemento dispersor (prisma ou rede)
    - sempre no feixe colimado
  - ↪ câmera
  - ↪ detector

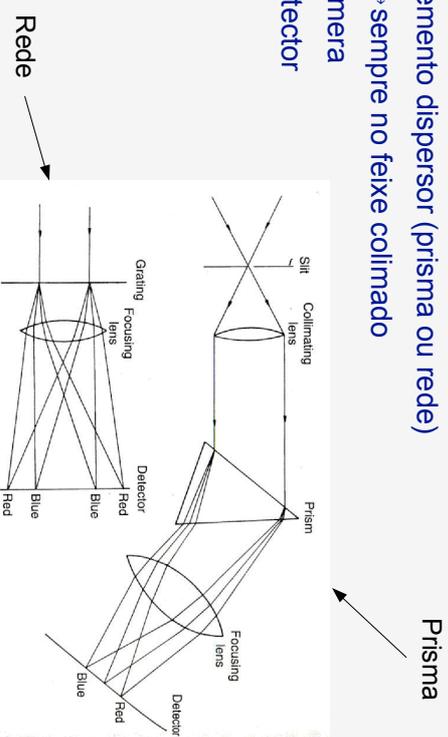


Fig. 3.10. The essential optical components of an astronomical slit spectrometer.

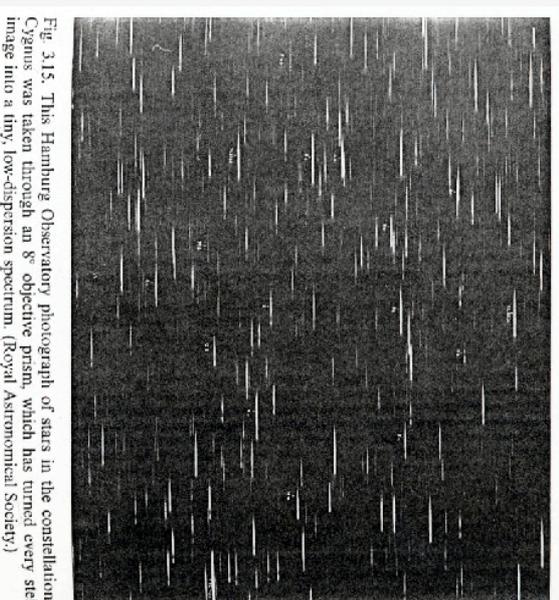


Fig. 3.15. This Hamburg Observatory photograph of stars in the constellation of Cygnus was taken through an 8" objective prism, which has turned every stella image into a tiny, low-dispersion spectrum. (Royal Astronomical Society.)

Smith



Fig. 3.16. A slitless spectrum of an object whose spectrum is almost entirely made up of emission lines, such as this planetary nebula (the Ring Nebula in Lyra), consists of a separate image of the nebula at each emission line wavelength. This reveals at a glance the different spatial distribution of the different ions that correspond to these lines. (Royal Astronomical Society.)

Smith

No espectro acima, se vê claramente a imagem da nebulosa.  
No caso de um espectro estelar, como seria o espectro?

## Unidade de campo integral Integral field unit (IFU)

- Um conjunto de fibras ópticas é colocado no plano focal
- Cada fibra leve o sinal para um espectrógrafo de fenda
- Temos, portanto, um “cubo” de dados onde os eixos são posição (=fibra), comprimento de onda e contagem
- Esses dados podem ser reconstruídos em imagens ou espectros (um não exclui o outro)

- Espectrógrafo de fibras ópticas
  - ↳ fibras ópticas no plano focal do telescópio
  - ↳ duas soluções
    - fibras cobrindo uma região do céu (*Integral field unit*)
    - 1 fibra para cada objeto

\* máscara ou

\* pinças

↳ fibras levam a luz para um espectrógrafo que pode ser fixo

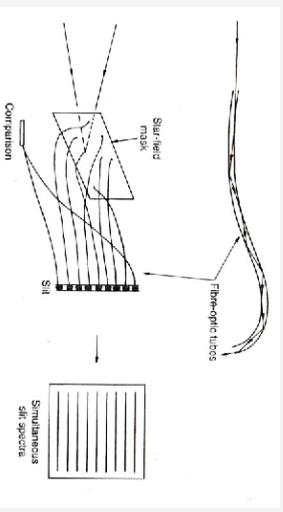
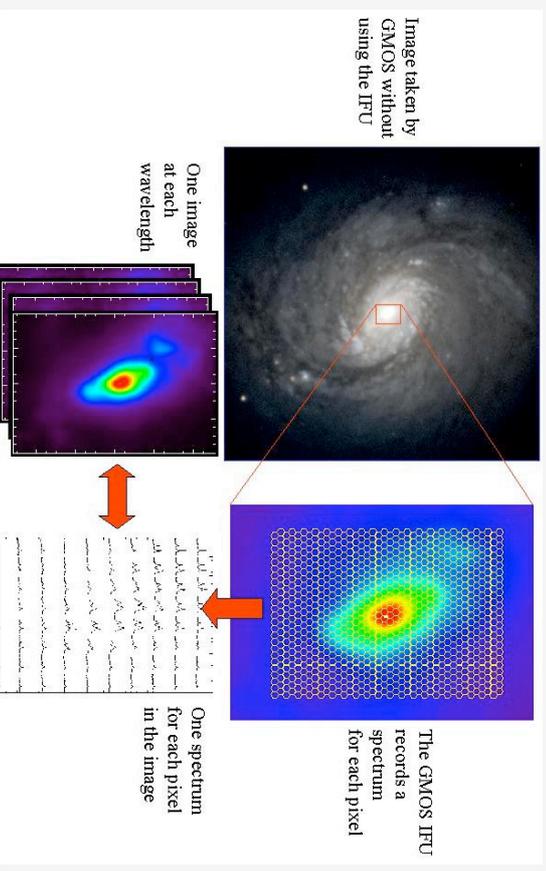


Fig. 3.17. Fiber-optic spectroscopy. The upper diagram shows the light-path through a typical fiber-optic tube, which is some 50  $\mu\text{m}$  in diameter. A mask is placed in the focal plane of the telescope, with holes at the positions of the stars of interest. The light from these stars is led along fiber-optic tubes to a conventional slit, so that the detector at the end of the spectrograph records simultaneously slit spectra of all the stars in the star field mask. The spectrum of a companion can easily be added on either side of the set of slit spectra.

Smith

## GMOS (Gemini multi-object spectrograph)- IFU



[http://star-www.dur.ac.uk/~jra/gmos\\_ifu.html](http://star-www.dur.ac.uk/~jra/gmos_ifu.html)

## SIFS (SOAR)

- 1300 fibras (23 x 50)
- 2 escalas de placa
  - ◊ 3.9 x 7.5"
  - ◊ 7.8 x 15"
- angular resolution (about 0.15 arcsec, with tip-tilt correction)
- medium resolution spectroscopy (R = 1000 – 30000)
- <http://www.jna.br/~sifs/index.html>

## Montagens de espectrógrafos

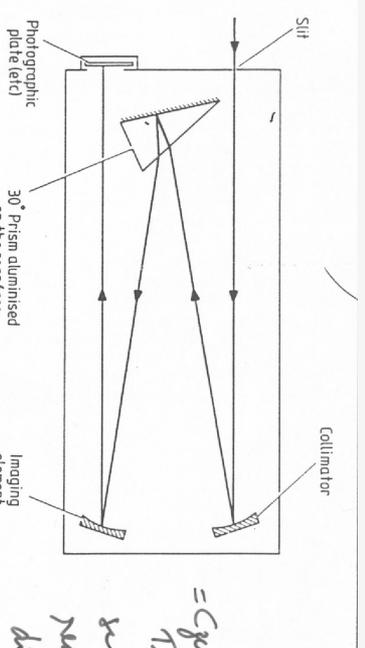


Figure 4.2.1 Compact design for the basic prism spectrograph.

Kitchin

= getting -  
 Turner  
 se cl  
 rede de  
 difracç

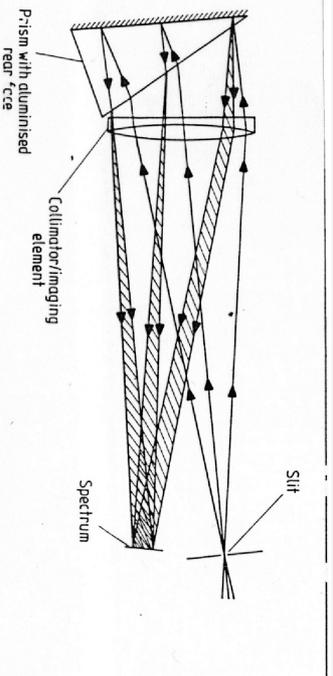


Figure 4.2.2 Light paths in a Littrow spectrograph.

Kitchin

= Estat se cl rede  
 de difracç

## Círculo de Rowland

- utiliza rede curva
- rede pode fazer a função do colimador ou imageador
- um elemento óptico a menos, assim a perda é menor

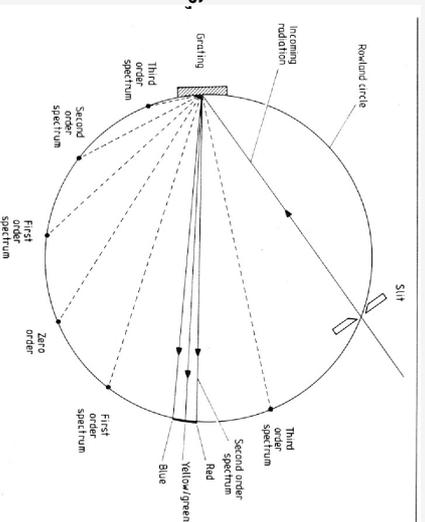


Figure 4.1.12 Schematic diagram of a spectrograph based upon a Rowland circle, using a curved grating blazed for the second order.

Kitchin

### Eagle

- montagem com rede curva, porém mais compacta que círculo de Rowland
- astigmatismo

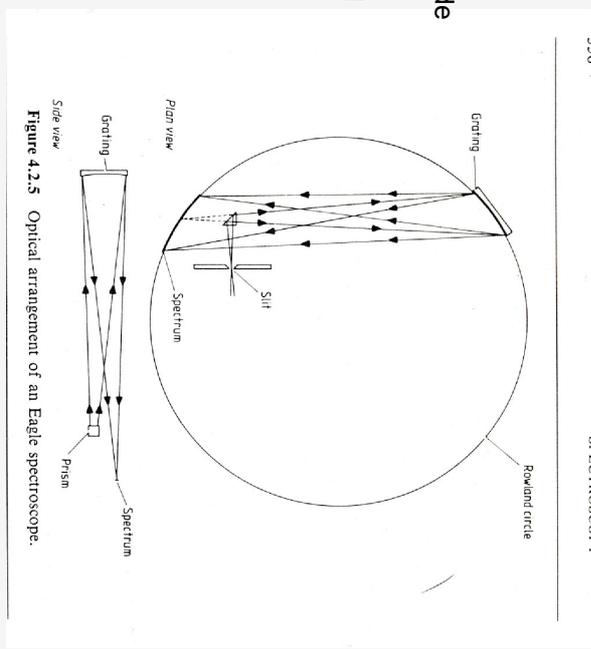


Figure 4.2.5 Optical arrangement of an Eagle spectrograph.

Kitchin

### Wadsworth

- possui aberrações importantes

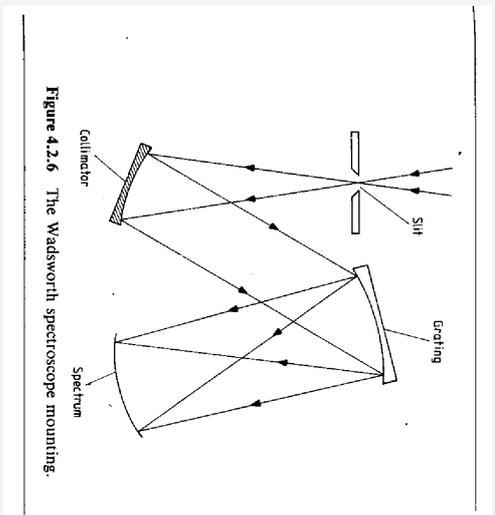


Figure 4.2.6 The Wadsworth spectrograph mounting.

Kitchin

### Dispersão linear

- Dispersão linear (mm/Å)

$$\frac{dx}{d\lambda} = f_2 \frac{d\theta}{d\lambda}$$

antes vimos a dispersão angular

↪  $f_2$ : distância focal do elemento que forma a imagem final

↪ Para uma rede

$$\frac{dx}{d\lambda} = \pm \frac{mf_2}{d \cos\theta}$$

→ a dispersão linear de uma rede é praticamente constante ao longo do espectro (o que não é verdade para um prisma)

### Obtendo um espectro

- O espectro obtido com instrumento não corresponde perfeitamente ao real. Um dos motivos é que o espectrógrafo não possui um resolução infinita em frequência. Podemos representar essa transformação como:

$$\Phi I(\nu) = P(\nu) * I_0(\nu)$$

→  $I_0(\nu)$ : espectro real

→  $I(\nu)$ : espectro observado

→  $P(\nu)$ : perfil instrumental

- Se  $P(\nu) = \delta(\nu - \nu_0) \Rightarrow I(\nu) = I_0(\nu)$

- Se perfil instrumental é conhecido e razão sinal-ruído é alta (> 100 – 1000), o espectro real pode ser obtido pela deconvolução do espectro medido

## Procedimentos observacionais

- flats – com luz passando por todo o espectrógrafo
  - ↳ pois sensibilidade depende do comprimento de onda
- imagens da lâmpadas com emissão de elementos específicos
  - ↳ para calibração em comprimento de onda
- subtração do fundo de céu
  - ↳ para fontes puntiformes, o céu sempre atravessa a fenda e seu espectro é também medido, podendo ser subtraído do espectro da fonte

AST203 – CVR

9-53

## Exemplo de observação Goodman - SOAR



Imagem de campo sem fenda sem elemento dispersor

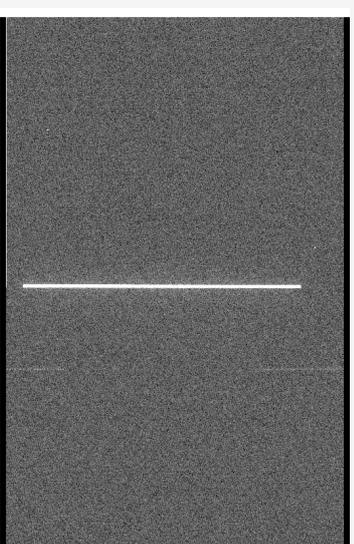
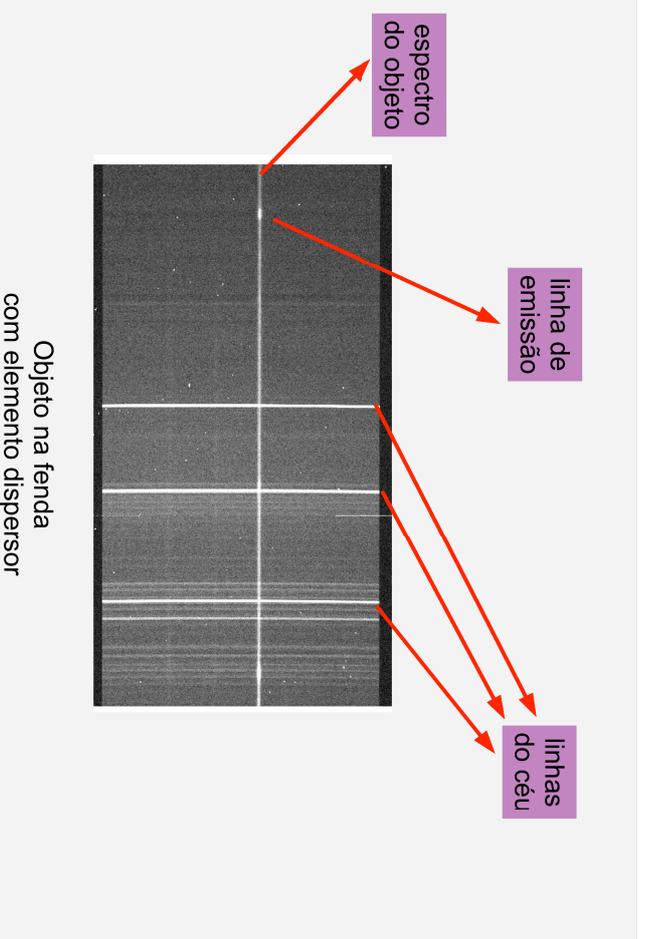


Imagem do objeto na fenda sem elemento dispersor. Iluminação neste caso é dominada pelo céu.

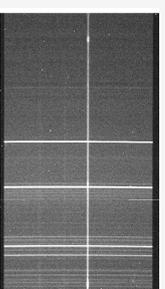
AST203 – CVR

9-54



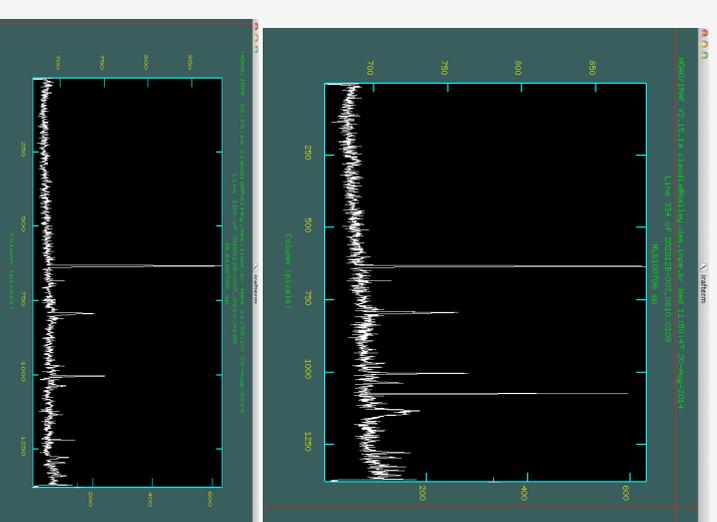
AST203 – CVR

9-55



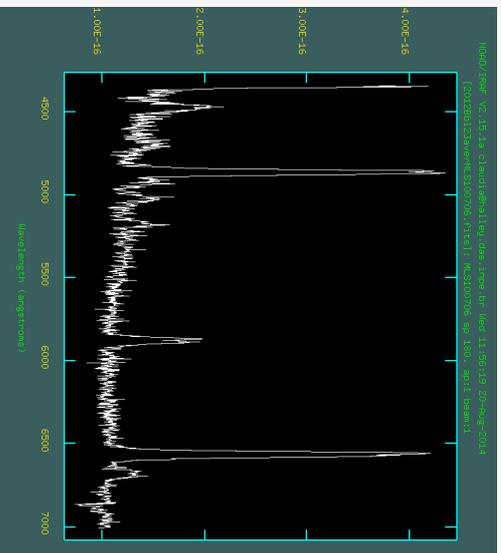
AST203 – CVR

9-56



## Espectro final

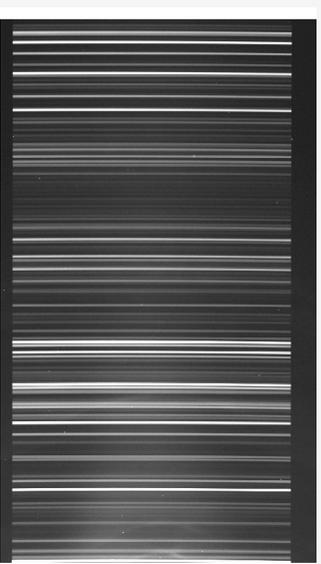
- unidimensional
- subtraído céu
- calibrado em comprimento de onda



AST203 – CVR

9-57

## Espectro de lâmpada Calibração em comprimento de onda



AST203 – CVR

9-58

## Outras técnicas espectroscópicas

### Filtros interferenciais

- Filtros com faixa de transmissão igual ou menor que 5nm
- mecanismo: múltiplas reflexões entre duas superfícies paralelas
  - ↳ se diferença de caminho óptico = múltiplo inteiro do comprimento de onda, temos interferência construtiva
  - ↳ para os demais comprimentos de onda a interferência é destrutiva

AST203 – CVR

9-59

AST203 – CVR

9-60

- construção
- ◊ camada dielétrica de largura  $d$  e índice de refração  $n$

- no caso de incidência normal, interferência construtiva ocorre para

$$\diamond 2 n d = m \lambda$$

$$\diamond \lambda_m = (2 n d) / m$$

- $m$  deve ser pequeno para não ocorrer contaminação por comprimento de onda indesejado

$$\Delta \lambda_m = \lambda_m - \lambda_{m-1} = \frac{2nd}{m(m+1)}$$

Qual o valor típico de  $d$ ?

- pode ser usado um filtro de banda larga para excluir comprimentos de onda adjacentes

- $2 d n \cos \theta = m \lambda$

- ◊  $\theta$ : ângulo de incidência
- ◊  $n$ : índice de refração do material entre as placas
- ◊  $d$ : separação entre placas
- ◊  $m$ : ordem da franja

*Optical detectors and instruments.*

$$2 \mu d = m \lambda$$

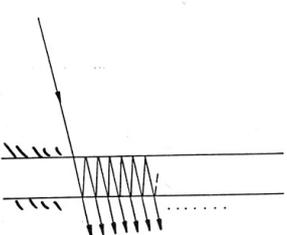
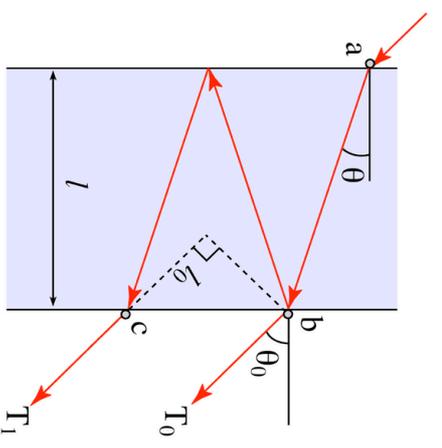


Fig. 3.18. The principle of an interference filter: Light incident at an angle on a glass plate with accurately parallel faces suffers multiple internal reflections before emerging as a set of parallel rays of decreasing intensity, all at the same angle to the plate. These rays will interfere with one another, giving maximum light if the path difference between successive rays is an exact number of wavelengths. In practical use, the angle of incidence is usually  $90^\circ$  ('normal' incidence – see Fig. 3.19).

Smith

- A explicação do Kitchin para chegar nos comprimentos de onda onde ocorre interferência construtiva não está correta
- Ela pode ser encontrada em:  
◊ [http://en.wikipedia.org/wiki/Fabry\\_Perot](http://en.wikipedia.org/wiki/Fabry_Perot)



Etalon:

Fora etalon:

Propagação:  $e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}}$

Note que a defasagem:  $k_o \lambda_o$

$$k = 2\pi n / \lambda$$

$$k_o = 2\pi n_o / \lambda_o$$

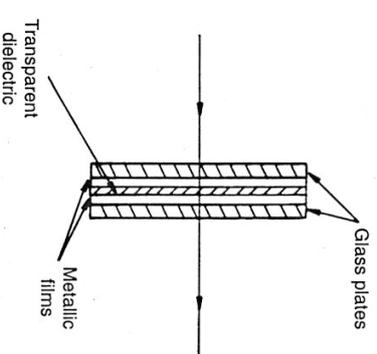


Fig. 3.19. A practical interference filter, used at normal incidence. The glass plates act merely as support for the transparent dielectric, within which the internal reflection occurs. The highly reflective metal films ensure that successive rays are not too different in brightness. Internal reflection in the glass plates is small and has a negligible effect.

Smith

## Etalon Fabry-Perot

- Processo físico idêntico ao do filtro interferométrico
- duas placas de vidro paralelas com as faces internas recobertas de metal
  - ↳  $\lambda$  é ajustável via
    - mudança da distância entre placas OU
    - mudança do índice de refração
- montagem
  - ↳ deve ser montado em feixe colimado
- pode ser usado como
  - ↳ um filtro interferencial
  - ↳ como parte de um espectrógrafo

AST203 – CVR

9-65

- imagens em vários comprimentos de onda
  - ↳ filtro interferencial de  $\lambda$  variável
- como elemento dispersor em espectrógrafo
  - ↳ a luz proveniente da fenda atinge o etalon a diferentes ângulos
  - ↳  $R \sim 10^7$
  - ↳ instrumento usado em laboratórios
    - determinação de força de osciladores
    - probabilidade de transição

AST203 – CVR

9-66

242 5. Spectral Analysis

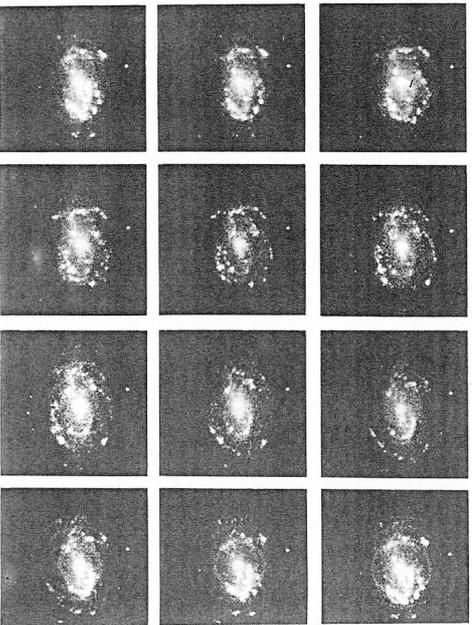


Fig. 5.27. Interferograms of the galaxy NGC 2903, obtained using a scanning Fabry-Perot interferometer in the H $\alpha$  line (656.3 nm). The variation in order is obtained using piezoelectric wedges, and the free spectral interval is scanned in 24 steps (of which 12 are shown on the figure). Each photon is recorded on a 512  $\times$  512 matrix by a photon counting camera. The number of photons measured is proportional to the intensity emitted at a given Doppler speed. The radial velocity of hydrogen in the galaxy is thus mapped. The integration time per step was 5 min. (Observatoire de Marseille, 3.5 m CFH telescope, Hawaii; Marcehn, M. et al., *Astron. Ap.* 128, 140, 1983. With the kind permission of *Astronomy and Astrophysics*)

AST203 – CVR

Léna

9-67

**4.6.1 The Fabry-Perot etalon**  
 The Fabry-Perot interferometer is an imaging spectrometer which is formed by placing a device called an **etalon** in the collimated beam of a typical camera system. A typical arrangement is shown in Fig. 4.6. The etalon consists of two plane parallel plates with thin,

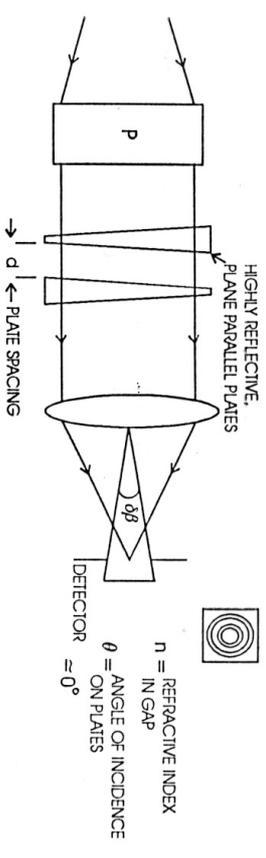
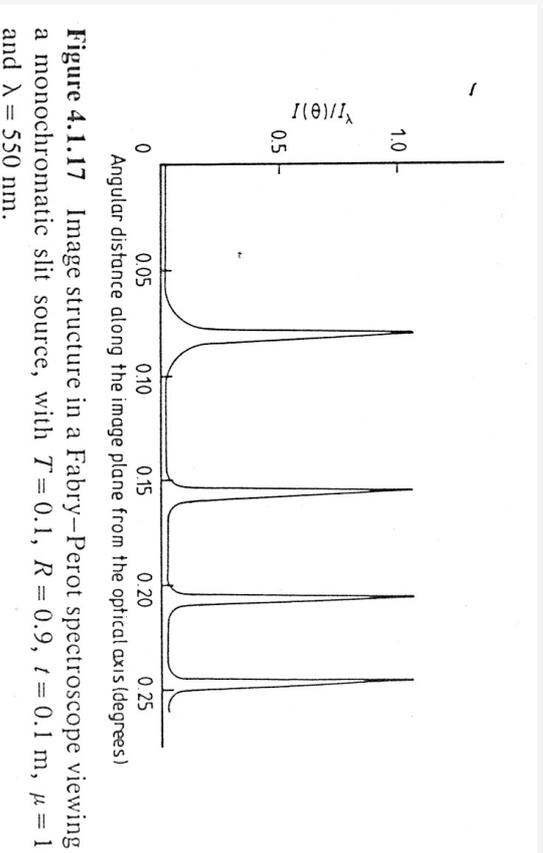


Fig. 4.6. A typical arrangement for a Fabry-Perot interferometer is shown.

McLean

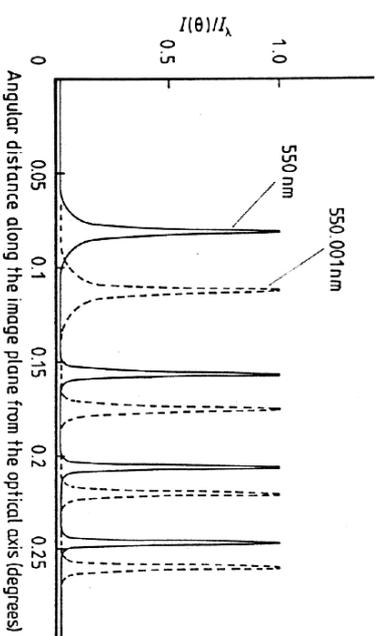
AST203 – CVR

9-68



**Figure 4.1.17** Image structure in a Fabry-Perot spectroscope viewing a monochromatic slit source, with  $T = 0.1$ ,  $R = 0.9$ ,  $t = 0.1$  m,  $\mu = 1$  and  $\lambda = 550$  nm.

Kitchin



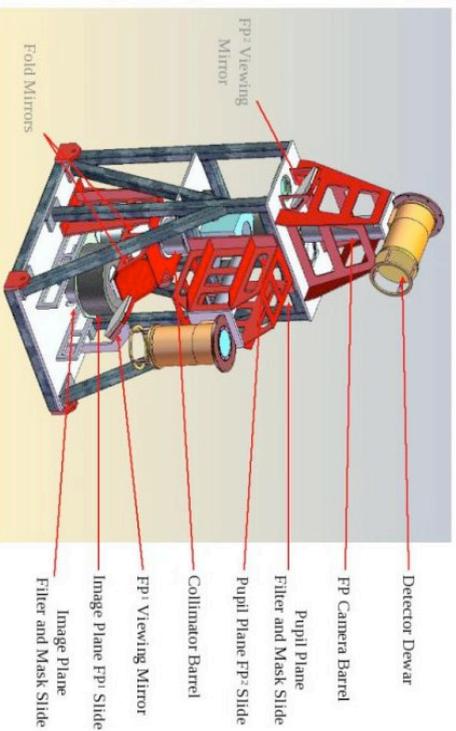
**Figure 4.1.18** Image structure in a Fabry-Perot spectroscope viewing a bichromatic slit source, with  $T = 0.1$ ,  $R = 0.9$ ,  $t = 0.1$  m,  $\mu = 1$ ,  $\lambda = 550$  nm (full curve) and  $\lambda = 550.001$  nm (broken curve).

Kitchin

## BTFI-SOAR

- Fabry-Perot + tunable filter

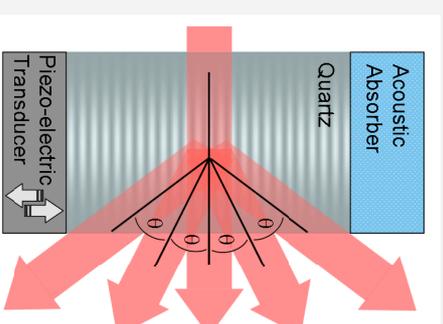
BTFI mechanical structure  
(Rene Laporte – INPE)



## Modulador acústico-óptico

Um tipo de “filtro ajustável” é baseado na difração de Bragg (espalhamento em cristais)

“An acousto-optic modulator (AOM) consists of a piezoelectric transducer which creates sound waves in a material like glass or quartz. A light beam is diffracted into several orders. By vibrating the material with a pure sinusoid and tilting the AOM so the light is reflected from the flat sound waves into the first diffraction order, up to 90% deflection efficiency can be achieved.”



Wikipedia